한국기계가공학회지, 제16권, 제1호, pp.149～156(2017.02) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.16, No.1, pp.149~156(2017.02)ISSN2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.16.1.149

블록직선이송 방전연삭에 의한 미세전극 가공 및 그래핀 강화 알루미나 복합소재의 마이크로 홀 가공특성

정현아*, 이창훈**, 강명창*,#
*부산대학교 융합학부, **부산대학교 부품소재산학협력연구소

Fabrication of Micro-electrodes using Liner Block Moving Electrical Discharge Grinding and Characteristics of Micro-hole Machining of Graphene Nanoplatelet-reinforced Al_2O_3Composites

Hyeon-A Jeong*, Chang Hoon Lee**, Myung Chang Kang*,#
*Graduate School of Convergence Science, Pusan National University,
**Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National University

(Received 7 December 2016; received in revised form 13 January 2017; accepted 13 Ferbruary 201)

ABSTRACT

Graphene nanoplatelet (GNP)-reinforced alumina (Al_2O_3) is a promising material for micro-partapplications, particularly micro-nozzle shapes, because of its excellent wearresistance. In this study, a Al_2O_3/GNPcomposite with 15 vol% graphene nanoplatelets (GNP) was highly densified and fabricated via spark plasma sintering for micro-electrical discharge drilling (Micro-ED drilling) and the wear resistance property of the composite is evaluated via the ball-on-disk method. In addition, the diameter and shape of the micro-electrodes machined by wire electrical discharge grinding (WEDG), block electrical discharge grinding (BEDG), and new linear block moving electrical discharge grinding (LBMEDG) methods are systematically compared and analyzed to observe the micro-hole machining in the micro-ED drilling of the Al_2O_3/15vol% GNP composite.

Key Words : Al_2O_3/GNP Composite(그래핀 강화 알루미나 복합소재), Wear Resistance(내마모성), Micro-Electrical Discharge Drilling(마이크로 방전홀가공), Linear Block Moving Electrical Discharge Grinding(블록직선 이송방전연삭)

1. 서 론

구조세라믹과 그래핀 복합소재는 비강도 및 마찰특성과 같은 기계적 특성이 우수하여 베어링, 밸브뿐만 아니라 미세핀과 미세노즐 등 극한환경에서의 응용이 요구되고 있다. 그러나 세라믹과 그래핀 복합소재의 경우 높은 경도(High hardness), 취성(Brittlness), 굽힘강도(Bending strength) 그리고 인성(Toughness)과 같은 재료특성을 가지고 있어 밀링,

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

드릴링과 같은 기계가공공정 적용시 이른 공구파손(Tool breakage)과 더불어 크랙 전파(Crack propagation)에 의한 재료파괴 등으로 인해 가공공정 적용상 상당한 제약이 있다.

한편, 마이크로 방전 홀 가공(Micro-ED drilling, Micro-Electrical Discharge drilling)은 일정이상의 전기전도도(@>0.3 S/m)를 가지면 경도에 상관없이 미세형상가공이 가능하다. 이에, 알루미나(Al_2O_3)에 그래핀 나노박막(Graphene nanosheet)[1], 산화 그래핀(Graphene oxide)[2] 또는 그래핀 나노박판(Graphene nanoplatelet)을 강화재(Reinforcement)[3]로 첨가한 그래핀 강화 알루미나 소재에 대해 분말합성[4], 소결방법[5], 미세구조분석[6] 및 전기전도도(Electrical conductivity)와 열전도도(Thermal conductivity)와 같은 재료물성 향상[7]과 관련된 결과가 보고되고있지만 재료물성 및 소결관점의 연구로 국한되어있다.

따라서, 본 연구에서는 방전플라즈마소결법(SPS, Spark Plasma Sinterimg)에 의해 고치밀화된 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재를 이용하여, 내마모성 부품으로의 적용가능성을 알아보고자 Ball-on-disk 방법을 사용하여 내마모특성을 평가하였다. 기존에 보고된 와이어방전연삭장치와 블록방전연삭장치를 이용하여 미세전극을 가공하였다. 그리고 새로이 블록직선이송 방전연삭(LBMEDG, Linear Block Moving Electrical Discharge Grinding)을 제안하여 미세전극 가공을 수행하고, 전극형상을 비교평가하였다. 미세전극을 이용하여 실제 홀 형상을 가공하고 광학현미경을 이용하여 홀 가공상태를 관찰하였다.

2. Al_2O_3/GNP 복합소재 및 미세전극의 제조

2.1 Al_2O_3/GNP 복합소재 제조

Fig. 1은 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 모식도를 나타내었다. 선행연구에서 GNP 함유량에 따라 Al_2O_3/0 ~ 20vol% GNP 복합소재재료물성을 평가한 결과 Al_2O_3/15vol% GNP의 상대밀도, 경도 그리고 전기전도도 등을 확인 할 수 있었다.[8] GNP 분산 및 강화효과로 인해 복합소재의 물성이 우수한 것으로 알 수 있다.[9-10] 먼저, Al_2O_3 분말에 GNP 분말을 15vol%의 함유량으로 첨가하여 합성 및 분산과

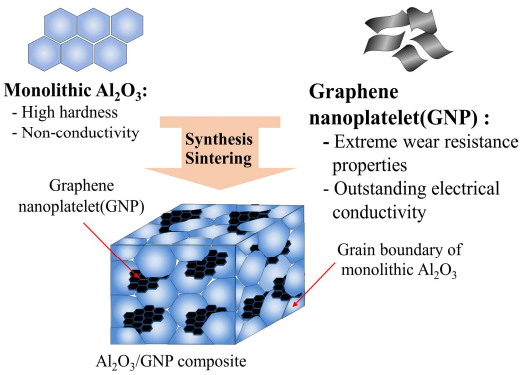


Fig. 1 Schematic diagram on outstanding material and wear resistance properties of Al_2O_3/15vol% GNP composite[1,3-6]

Table 1 Material properties of Al_2O_3 and Al_2O_3/GNP composite fabricated by SPS method[9]

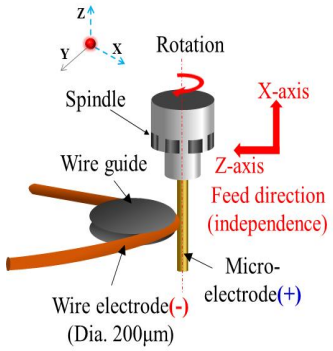
	Monolithic Al_2O_3	Al_2O_3/15vol% GNP composite
Relative density(%)	99.8	99.0
Vickers hardness(GPa)	20.31	16.29
Electrical conductivity(S/m)	-	1040.12
Thermal conductivity (W/m·K)	41.00	18.00

정을 통해 제조된 복합분말을 방전플라즈마소결법을 이용하여 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재로 제조하였다. 이때, 복합소재는 소결온도 1500℃, 압력 40 MPa, 유지시간 10 min의 조건으로 소결하였다. 제조된 복합소재의 재료물성 값은 Table 1에 나타내었다.

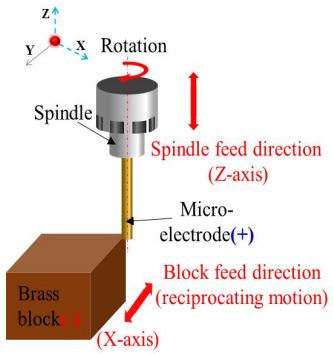
2.2 기존 미세 전극가공 공정

Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 마이크로 방전 홀 가공을 하기 위해서는 고종횡비 형상(HAR, High Aspect Ratio)의 미세전극 가공이 선행되어야 한다. Fig. 2는 미세전극을 가공하기 위해 사용된 방전 연

삭가공공정을 나타내었다. Fig. 2(a)는 와이어방전연삭가공공정(WEDG, Wire Electrical Discharge Grinding)이며 Fig. 2(b)는 블록방전 연삭가공공정(BEDG, Block electrical discharge grinding)이다. WEDG와 BEDG의 경우 척(Chuck)으로부터 전극을 분리하지 않고, 기계상(On-machine)에서 가공할 수 있어 전극의 클램핑 오차(Clamping error)를 줄일 수 있는 이점이 있다. 그러나 WEDG 방법은 와이어장력 제어가 매우 중요한 요소기술로서 고종횡비형상 가공에는 불리하며, 가공시간이 많이 걸리는 단점을 가지고 있다. 그리고 BEDG 방법은 Z축과 블록이 같이 움직이므로 원하고자하는 직경가공이 어려운 단점이 있다.



(a) Wire-electrical discharge grinding (WEDG)

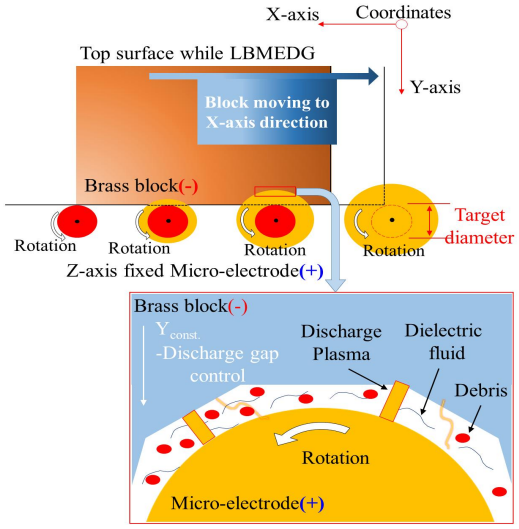


(b) Block-electrical discharge grinding (BEDG)

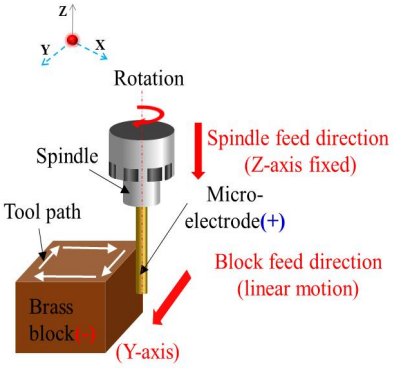
Fig. 2 Conventional machining method for micro-electrode in micro-electrical discharge machining process[11]

2.3 LBMEDG공정의 미세 전극가공 공정

Fig. 3(a)는 고종횡비 형상의 일정한 직경을 가지는 미세전극을 가공하는 새로운 블록직선이송 방전연삭(LBMEDG, Linear block moving electrical discharge grinding)공정을 나타내었다. Fig. 3(b)는 제안한 LBMEDG의 미세전극 공정이다. LBMEDG의 경우 텅스텐 전극은 가공하고자 하는 길이만큼 Z축



(a) Fabrication principle of micro-electrode suggested by LMBEDG process



(b) Linear block moving-electrical discharge grinding method (LBMEDG)

Fig. 3 A new linear block moving electrical discharge grinding for fabrication of micro-electrode having constant diameter[12]

으로 이송하고, 전극직경은 X 또는 Y축 직선운동을 수행하는 블록전극(방전갭제어)에 의해 가공되는 방전연삭공정이다. 이는 기존 미세 전극가공 방법인 WEDG와 BEDG보다 미세 전극가공 시간이 짧고, 일정한 전극직경을 가질 것으로 생각된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 LBMEDG공정의 미세 전극가공평가법

미세전극재료는 전극마모를 최소화하기 위해 융융점이 높은 텅스텐전극(Tungsten electrode)을 사용하였다. 전극가공을 위해 와이어(Dia. 200㎛) 및 블록(15mm×15mm×10mm)은 황동(Brass) 소재를 사용하였다. 전극가공용 소재보다 텅스텐 전극의 제거를 크게 하고자 텅스텐전극은 양극(Positive), 와이어 및 블록은 음극(Negative)으로 설정하였다. 또한, 전극가공조건은 전압 200V, 커패시턴스 47nF, 전극회전수 1000 rpm 그리고 이송속도는 10㎛로 고정하였고, 전극의 오버행(Overhang)은 3.5mm로 동일하게 설정하여, 가공된 미세전극 형상을 광학현미경(OM, Optical Microscope)을 이용하여 비교 평가하였다.

Fig. 4는 Al_2O_3/15vol.% GNPs 복합소재의 내마모성(Wear resistance) 평가를 위해 ASTM C1412 기준[13]에 근거한 Ball-on-disk method을 보여주며, Table 2는 내마모성 평가실험을 위한 조건을 보여준다. Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 내마모성에 미치는 GNP의 영향을 관찰하기 위해 Counterpart 소재는 세라믹 기지와 같은 Al_2O_3(13.5GPa)[10]로 정하였다. 내마모성 평가시편은 Diamond band saw(DCS-200, MTI Diamond Co., ltd)를 이용하여 20mm×20mm×4mm의 크기로 절단하여 실험하였다[12].

3.2 Al_2O_3/GNP 복합소재 마이크로 방전홀 가공법

마이크로 홀 방전을 위한 마이크로 방전가공기는 하이브리드정밀(Hybrid precision Co. Korea)에서 제작된 Hyper-15 모델이며, RC-Type의 방전회로를 사용하였으며, 홀 가공깊이는(Layer depth)는 1500㎛, 가공조건은 전압 100V, 커패시턴스10nF, 전극회전수 1000 rpm 그리고 이송속도는 10㎛로 고정하여 마이크로 홀 방전가공을 수행하였다.

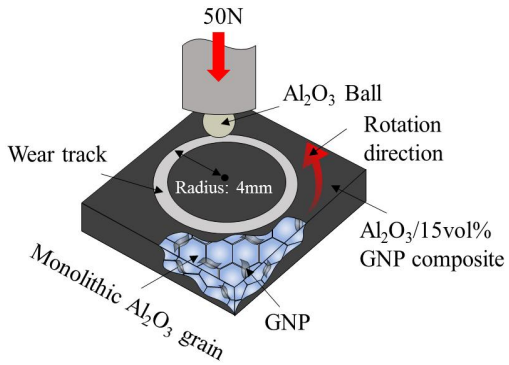


Fig. 4 Ball-on-disk method on Al_2O_3/GNP composite for evaluation of wear resistance

Table 2 Experimental conditions for evaluation of wear resistance by using ball-on-disk method on Al_2O_3/15vol% GNP composite

Parameters	Description
Test set-up	Ball-on-disk tribometer
Wear specimen	**Monolithic Al_2O_3, Al_2O_3/15vol% GNP composite**
Counterpart material	Al_2O_3 ball
Cycle time(min)	60
Speed(m/s)	1.5
Load(N)	50
Lubricant condition	Dry

4. 실험결과 및 고찰

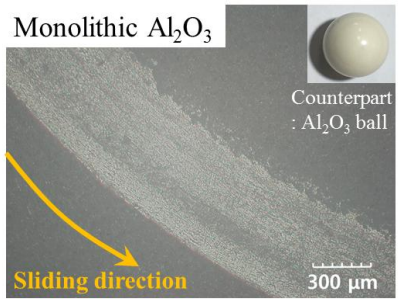
4.1 Al_2O_3/GNP 복합소재의 내마모특성

Fig. 5는 Monolithic Al_2O_3와 Al_2O_3/15vol%GNP 복합소재의 내마모시험 결과를 보여준다. Fig. 5(a, b)는 각 소재 표면위에 형성된 마모트랙(Wear track)

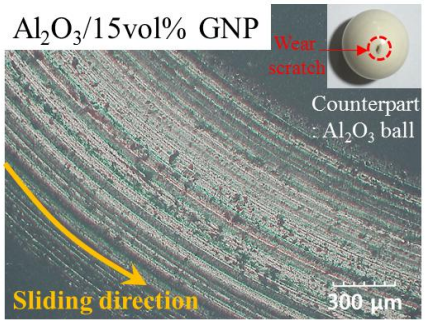
상이한 것을 알 수 있으며, 이는 내마모시험이 진행될수록 마찰로 인해 상대재가 복합소재 표면에 융착된 것으로 생각된다.[7,12] Fig. 5(c)는 사이클 시간에 따른 마찰계수이다. Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 마찰계수 0.09가 Al_2O_3 0.16의 마찰계수보다 낮은것을 알 수 있다. 이는 GNP가 Al_2O_3에 첨가되면서 발생하는 인성강화 메커니즘(Toughening mechanism)으로 윤활효과(Lubricant effect)로 인한 결과로 생각된다.[13]

4.2 WEDG, BEDG 및 LBMEDG 공정의 미세전극가공 비교

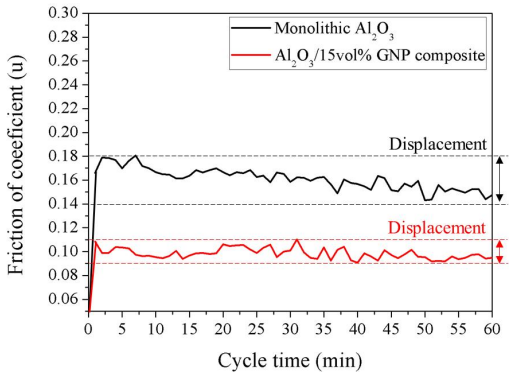
Fig. 6(a)는 100㎛ 직경을 가지는 미세전극을 가공할 목표로, 300㎛직경을 가지는 텅스텐전극을 이용하여 각 전극가공공정으로 가공한 후 관찰한 사진이다. Fig. 6(b)는 100㎛의 직경을 가지는 미세전극 가공을 목표로 가공한 후 각 공정별로 일정한 거리의 4지점에서 직경을 측정하여 평균을 나타내었다. WEDG공정의 가공결과는 목표로 한 직경인 100㎛에 근접한 136.20㎛의 직경으로 가공된 반면 전극의 엣지방향(Direction of electrode edge)으로 직경이 가늘어 지는 테이퍼현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 전극을 미세하게 가공할 경우 전극의 엣지부에서 와이어전극과 엣지부에 순간적인 방전집중(Discharge concentration)이 발생하여 많은 텅스텐 전극재료를 순간적으로 용융 및 기화시킨 것으로 생각된다[14-15]. BEDG공정으로 가공된 전극의 경우 WEDG로 가공된 미세전극에서 발생한 테이퍼현상 관찰과 더불어 223.17㎛의 직경을 측정할 수 있었다. 이는 300㎛직경의 텅스텐 전극직경 대비 불과 21.60㎛정도의 직경이 가공이 이루어졌으며, 이러한 현상은 BEDG의 가공경로로 인해 텅스텐 전극재료는 양극 그리고 블록 전극은 음극으로 설정하였음에도 불구하고 더욱 많이 용융 및 기화된 것으로 생각된다. 이에, 노즐의 미세 홀 가공을 수행함에 있어서 미세전극을 WEDG와 BEDG로 가공할 경우 방전집중현상 해결 및 공구경로의 개선이 필요하다. 본 연구에서 제안한 LBMEDG공정을 이용할 경우에 Fig. 6(b)와 같이, 각 공정별 임의의 4군데의 측정위치에서 평균 103㎛의 전극직경을 가진다.



(a) Wear track of monolithic Al_2O_3



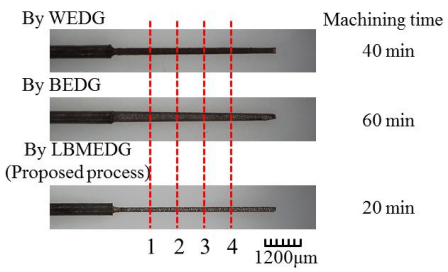
(b) Wear track of Al_2O_3/15vol% GNP composite



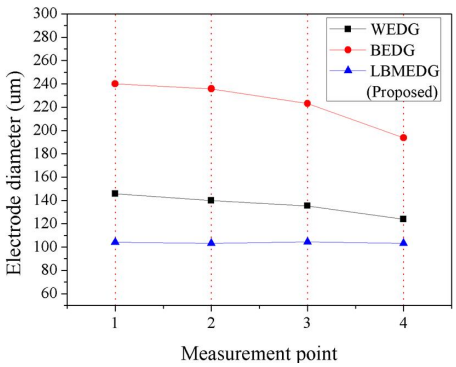
(c) Friction of coefficient of each materials

Fig. 5 Results of wear properties evaluation in monolithic Al_2O_3 and Al_2O_3/15vol.% GNP composite using optical micrograph

이는 목표로 한 100㎛ 직경에 근접하면서도 거의 일정한 전극직경을 가지며, 또한 전극가공시간을 비교한 결과, WEDG 40분, BEDG 60분 그리고 LBMEDG 20분으로 와이어와 블록에 의한 방전 총 에너지와 전극 이동경로에 의한 결과로 생각된



(a) Micro-electrode machined by WEDG, BEDG and LBMEDG

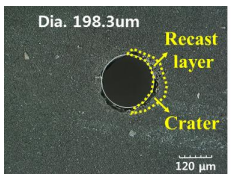


(b) Error of machined micro-electrode

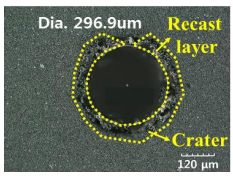
Fig. 6 Results of (a) micro-electrodes machined by WEDG, BEDG and LBMEDG and (b) error of machined micro- electrode diameter at 300㎛ electrode

다. Fig. 7은 앞서 텅스텐전극을 가지고 Fig. 6에서 얻어진 WEDG에서 미세전극 직경 136㎛, BEDG에 의한 미세전극 직경 223㎛ 그리고 새로이 제안한 LBMEDG공정에 의한 미세전극 직경 103㎛를 이용하여, 실제로 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재를 마이크로 방전 홀가공을 수행한 결과이다[12].

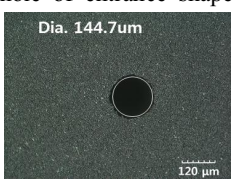
Fig. 7(a)는 WEDG를 이용하여 가공된 직경 136 ㎛ 미세전극을 사용하여 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재를 홀 가공한 결과이며, 입구부의 직경은 198.3㎛를 보였다. Fig. 7(b)는 BEDG공정을 이용하여 얻어진 직경 223㎛의 전극을 사용하여 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재를 홀 가공한 결과로서, 입구부의 직경은 296.9㎛를 보였다. 또한 Fig. 7(c)는 본 연구에서 새로이 제안한 LBMEDG 공정으로 가공한 미세



(a) Micro hole of entrance shape by WEDG



(b) Micro hole of entrance shape by BEDG



(c) Micro hole of entrance shape by LBMEDG

Fig. 7 Micro-hole shape machined by (a) WEDG (b) BEDG and (c) LBMEDG process

전극 직경이 103㎛ 인 것을 이용하여 홀 가공한 결과 입구부의 직경은 144.7㎛로 가공형상 오차가 작은 홀 직경을 얻을 수 있었다. 한편, 미세 홀이 가공된 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 입구형상을 관찰한 결과, 전극직경이 일정한 경우에 크레이터(Crater)나 표면 재응고층(Recast layer)이 현저하게 감소함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서, 방전플라즈마소결법을 통해 제조된 고치밀화 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재를 이용하여 내마모특성과 마이크로 전극가공공정에 따른 마이크로 홀 가공특성을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다. Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 평균 마찰계수는 0.09로써 Monolithic Al_2O_3의 평균 마찰계수인 0.16보다 우수한 내마모성을 가지며, 또한 높은 전기전도성으로 인하여 방전가공이 유용한 소재이다. 새로이 제안한 블록직선이송 방전연삭(LBMEDG)

공정을 사용하여 전극을 가공하는 경우에 와이어방전연삭과 블록방전연삭에 비해 평균 직경값 103㎛로 매우 일정한 직경을 가지는 미세전극을 얻었다. 이를 통해 실제 Al_2O_3/15vol% GNP 복합소재의 미세 방전 홀 가공을 한 입구부의 직경은 144.7㎛로 가공형상 오차가 작은 홀 직경을 얻을 수 있었다. 또한 입구부 가공형상도 매우 양호하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 향후 고종횡비형상의 내마모성 노즐가공 응용연구를 수행하고자 한다.

후 기

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2014R1A1A2055984).

REFERENCES

1. Fan, Y., Wang, L., Li, J., Li, J. and Sun, S., “Preparation and Electrical Properties of Graphene Nanosheet/Al_2O_3 Composites,” Carbon, Vol. 48, No. 6, pp. 1743-1749, 2010.
2. Xia, H., Zhang, X., Shi, Z., Zhao, C., Li, Y., Wang, J. and Qiao, G., “Mechanical and thermal properties of reduced graphene oxide reinforced aluminum nitride ceramic composites,” MAT SCI ENG A-STRUCT, Vol. 639, pp. 29-36, 2015.
3. Ramirez, C., Figueiredo, F. M., Miranzo, P., Poza, P. and Osendi, M. I., “Graphene Nanoplatelet/Silicon Nitride Composites with High Electrical Conductivity,” Carbon, Vol. 50, No. 10, pp. 3607-3615, 2012.
4. Porwal, H., Grasso, S. and Reece, M. J., “Review of graphene ceramic matrix composite,” Adv. Appl. Ceram., Vol. 112, No. 8, pp. 443-454, 2013.
5. Paweł, R., Piotr, K., Lucyna, J. and Ludosław, S. Aleksandra, D., “Thermal properties of pressure sintered alumina–graphene composites,” J. Therm Anal Calorim, Vol. 122, No. 1, pp. 105-114, 2015.
6. Liu, J., Yan, M. and Jiang, K., “Mechanical properties of graphene platelet-reinforced alumina ceramic composites,” Ceram. Int., Vol. 39, pp. 6215-6221, 2013.
7. Çelika, Y., Çelika, A., Flahautb, E. and Suvacia, E., “Anisotropic mechanical and functional properties of graphene-based alumina matrix nanocomposites,” J EUR CERAM SOC, Vol. 36, No. 8, pp. 2075-2086, 2016.
8. Sung, J. W., Kim, N. K. and Kang, M. C., “Material properties and machining performance of CNT and Graphene reinforced hybrid alumina composites for micro electrical discharge machining,” J. of KSMPE, Vol. 12, No. 3, pp. 3-9, 2013.
9. Govindaraajan B., Yadhukulakrishnan., Sriharsha Karumuri., Arif Rahman., ,Raman P., Singh, A., Kaan Kalkan., Sandip P. Harimkar., “Spark plasma sintering of graphene reinforced zirconium diboride ultra-high temperature ceramic composites,” CERAM INT, Vol. 39, pp. 6637-6646, 2013.
10. Sung, J. W., Kim, K. H. and Kang, M. C., “Effects of Graphene nanoplatelet contents on material and machining properties of GNP-dispersed Al_2O_3 ceramics for micro-electric discharge machining,” INT J PRECIS ENG MAN-GREEN TECHNOLOGY, Vol. 3, No. 3, pp. 247-252, 2016.
11. Hourmand, M., Sarhan, A.A.D. and Sayuti, M., “Development of new fabrication and measurement techniques of micro-electrodes with high aspect ratio for micro EDM using typical EDM machine”, Measurement, Vol. 97, pp. 64-78, 2017.
12. Jeong, H. A., “Machining characteristics of micro electrode fabrication and aspect ratio variation for micro electrical discharge drilling of Al_2O_3/Graphene composite,” A Thesis for a

Master, Pusan National University, Republic of Korea, 2017.

13. Kim, H. J., Lee, S. M., Oh, Y. S., Yang, Y. H., Lim, Y. H., Lim, Y. S., Yoon, D. H., Lee, C. G., Kim, J. Y., and Ruoff, R., "Unoxidized Graphene/Alumina Nanocomposite:Fracutre-and Wear-Resistance Effects of Graphene on Alumina Matrix," SCIENTIFIC REPORTS, Vol. 4, pp. 1-10, 2014.
14. Kang, M, C., Tak, H. S., Lee, C. H. and Kim, N. K., "Machining characteristics on ultrasonic vibration assisted micro-electrical discharge machining of carbon-nanotube reinforced conductive Al_2O_3 composite," J. of KSMPE, Vol. 13, No. 6, pp. 119-126, 2014.
15. Ryu, C. W. and Choi, S. D., "Characteristics of Surface Roughness Based on Wire Vibration and Wire-cut Electric Discharge Machining of Aluminum Alloy 6061 (I)," J. of KSMPE, Vol. 14, No. 2, pp. 59-66, 2015.